

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние различных факторов на процесс окисления сталей при нагреве в пламенных печах / С. М. Козлов [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2001. – № 2. – С. 127–129.
2. Окажинообразование сталей при сжигании газообразных топлив / А.Н. Минаев [и др.] // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1983. – № 12. – С. 98–100.
3. Разработка высокоэффективных режимов термической обработки кордовой стали в печах патентирования / В. И. Тимошпольский [и др.] // *Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ)*. – 2001. – № 4. – С 61–67.

УДК 669.18

М. Л. ГЕРМАН, канд. физ.-мат. наук (РУП «БелТЭИ»),
И. Н. ПЛЮЩЕВСКИЙ, канд. техн. наук (НАН Беларуси),
Н. Л. МАНДЕЛЬ, канд. техн. наук, В. А. ХЛЕБЦЕВИЧ (БНТУ)

ПЕРСПЕКТИВА СОЗДАНИЯ МИКРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС

В статье [1] рассмотрены технические направления модернизации металлургического производства в Республике Беларусь с целью создания собственной горнометаллургической отрасли. Учитывая важность затронутого вопроса, следует подчеркнуть актуальность формирования гибких микрометаллургических производств, обеспечивающих получение определенного сортамента полуфабрикатов, необходимых для нужд промышленных предприятий в условиях Республики Беларусь.

В настоящее время рост производства строительной, машиностроительной и других отраслей характеризуется увеличивающимся потреблением стального листа, полосового проката и другой металлопродукции, которая импортируется в Республику Беларусь. Разработка и внедрение новых металлургических технологий позволят решить проблему импортозамещения полосового проката с полным обеспечением внутреннего рынка и возможным увеличением экспортного потенциала. При этом следует учитывать такой фактор, как обеспечение максимально возможной независимости республики от импорта сырьевых и топливных ресурсов.

Необходимо отметить, что микрометаллургический завод по производству полосового проката может представлять собой производство с полным или частичным циклом. Полный цикл включает добычу и обогащение железной руды, производство окатышей или брикетов для восстановительного процесса, получение передельного чугуна (в доменной печи или методами бескоксовой металлургии) или губчатого железа в восстановительном реакторе, сталеплавильный процесс в кислородном конвертере или электродуговой печи, внепечную обработку стали в установке «печь – ковш», непрерывную разливку и прокатку стали в совмещенном литейно-прокатном агрегате до полос требуемой толщины. Частичный цикл производства ограничивается переплавом стального лома в электродуговой печи с промежуточным рафинированием в установке «печь – ковш» и завершающей непрерывной разливкой и прокаткой. Выбор технологии при частичном цикле производства определяется низкими капиталовложениями, минимальными энергетическими затратами и высокой производительностью в условиях технологического маршрута непрерывная разливка – прокатка. При этом конечная продукция должна обладать высоким качеством поверхности полосы, минимальным количеством металлургических дефектов, высоким уровнем сочетания прочностных и пластических характеристик.

Данным требованиям отвечает литейно-прокатный модуль технологии Castrip, представляющий собой метод прямого литья с однопроводной горячей прокаткой и обеспечивающий получение полос из низкоуглеродистой стали с высоким уровнем свойств и годовой производительностью 500000 т [3]. Отличительной особенностью установки Castrip является прямой контакт расплавленной стали с валками-кристаллизаторами (рис. 1, 2).

Принцип работы данного литейно-прокатного агрегата следующий. Жидкий металл через промежуточный ковш 2 и распределитель 3 подается в зону, ограниченную валками-кристаллизаторами. В межвалковом пространстве 5 осуществляются два процесса – кристаллизация расплава и пластическая деформация закристаллизовавшегося металла. При этом скорости литья значительно выше, чем в процессе производства тонкослябовых заготовок (скорость литья – 80 м /мин, время полного затвердевания – 0,15 с, средняя скорость охлаждения корки в кристаллизаторе – 1700 °C/с [4]). За-

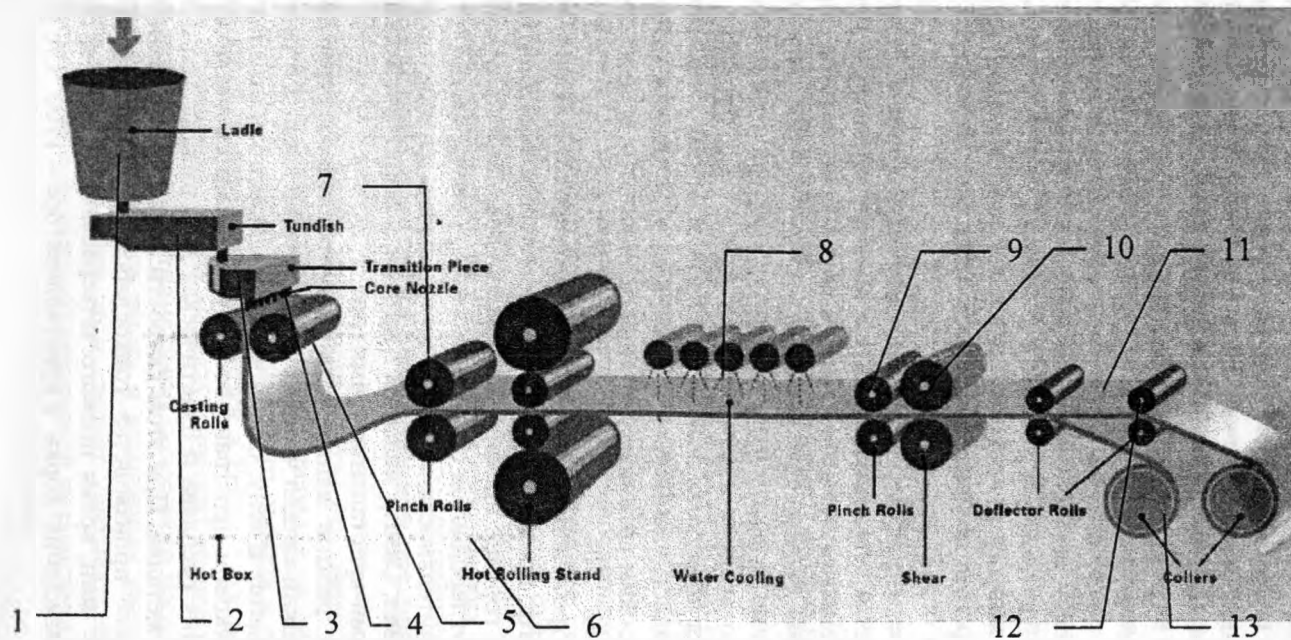


Рис. 1. Схема процесса Castrip: 1 – ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – распределитель жидкого металла; 4 – форсунки; 5 – валки-кристаллизаторы; 6 – камера с инертным газом (тепловой бокс); 7 – прокатный стан; 8 – зона охлаждения; 9, 10 – захватывающие ролики; 11 – зона разрезки; 12 – отклоняющие ролики; 13 – наматывающие устройства

тем полоса по ходу своего движения направляется из камеры с инертным газом 6 в однопроходной прокатный стан 7, где деформируется до требуемой толщины (0,7–2 мм) и после охлаждения 8 сматывается в рулоны 12, 13. Общая протяженность модуля – 60 м. Литейно-прокатный модуль Castrip позволяет в кратчайшие сроки изменять толщину и свойства конечной продукции.

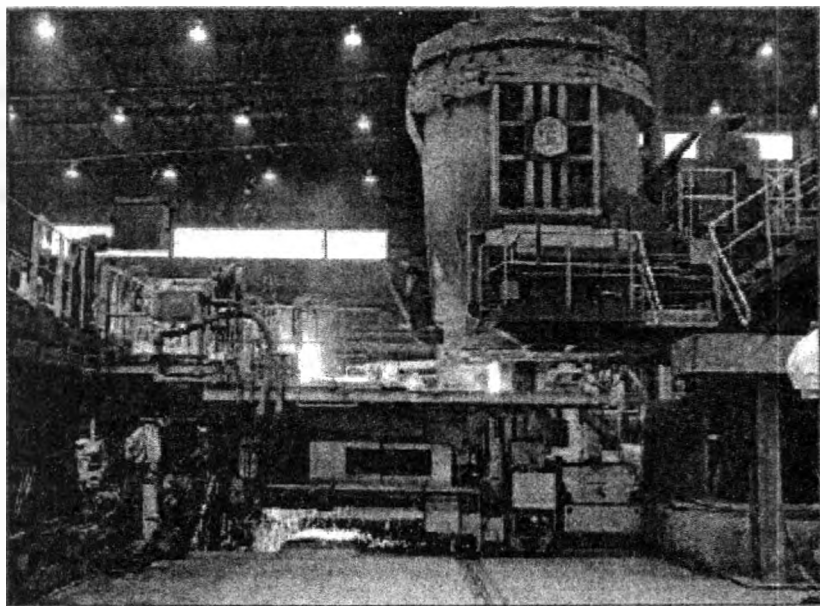


Рис. 2. Участок прямого литья полосы на заводе Nucor (США)

Варьирование микроструктурами, способными формироваться различными заданными режимами кристаллизации и деформации полос, обеспечивает широчайшие возможности получения разнообразных механических свойств для стали одного химического состава. Поскольку процесс Castrip обеспечивает получение полос толщиной 0,7–2,0 мм с высокими скоростями литья, создаются возможности производства новой продукции, в том числе с повышенными прочностными характеристиками [5].

Несмотря на то, что в процессе Castrip может использоваться стальной лом различного качества, для получения полосы с высо-

ким уровнем эксплуатационных показателей целесообразно дополнительное применение качественных шихтовых материалов, в частности передельного чугуна или губчатого железа в шихте при выплавке в электродуговой печи. Губчатое железо в виде брикетов, как правило, производится на функционирующих металлургических предприятиях с использованием бескоксовых (внедоменных) способов получения железа [1]. В качестве потенциального поставщика горячебрикетированного железа можно рассматривать Лебединский ГОК (Россия), где теоретически можно закупать данное сырье для микрометаллургического предприятия, работающего в условиях частичного цикла. Если в ближайшей перспективе предусмотрено создание предприятия с частичным циклом производства, то при годовой программе производства стальной полосы 500,0 тыс. т потребуется около 160,0–200,0 тыс. т горячебрикетированного железа.

Для того чтобы избежать зависимости от импорта железосодержащего сырья, целесообразно рассмотрение возможности создания микрометаллургического предприятия полного цикла по производству полосового проката, учитывая наличие собственных запасов железной руды. Поскольку большинство заводов, использующих прямое восстановление железа, имеют высокую годовую производительность, то вызывает интерес рассмотрение такой технологии прямого восстановления, которая бы отвечала требуемой производительности горячекатаных полос процесса Castrip. В работе [1] рассмотрены процессы бескоксовой металлургии, где показано, что одной из промышленно освоенных технологий производства жидкого чугуна является процесс Corex. На основании проведенных исследований разработана схема производства листового проката (рис. 3), включающая в себя шесть основных участков: участок подготовки шихты, плавильный участок, листопрокатный участок, конденсационную электростанцию, кислородную станцию, склад готовой продукции. Подготовленная шихта, представляющая собой смесь кусковой железной руды, окатышей, окалины известняка и доломита, загружается в восстановительную шахту через систему шлюзов, в которую из плавильного газификатора подается восстановительный газ, содержащий более 70 % CO. Восстановительный газ образуется в плавильном газификаторе при подаче угля и кислорода в необходимых пропорциях. Под действием восстановительного газа в шахте железная руда, окатыши и куски руды восстанавли-

ваются до состояния губчатого железа, которое затем загружается в плавильный газификатор через систему опускных труб. Туда же загружается металлическая стружка и уголь. Уголь газифицируется кислородом, подаваемым от кислородной станции, и частично сжигается. Выделяемая при этом теплота идет на расплавление губчатого железа, которое насыщается углеродом и превращается в чугун. Чугун из плавильного реактора поступает на установку десульфурации, где осуществляется его очистка от серы, и направляется в кислородный конвертер или электродуговую печь. Сталь из кислородного конвертера поступает на участок внепечной обработ-

Технологическая схема мини-завода

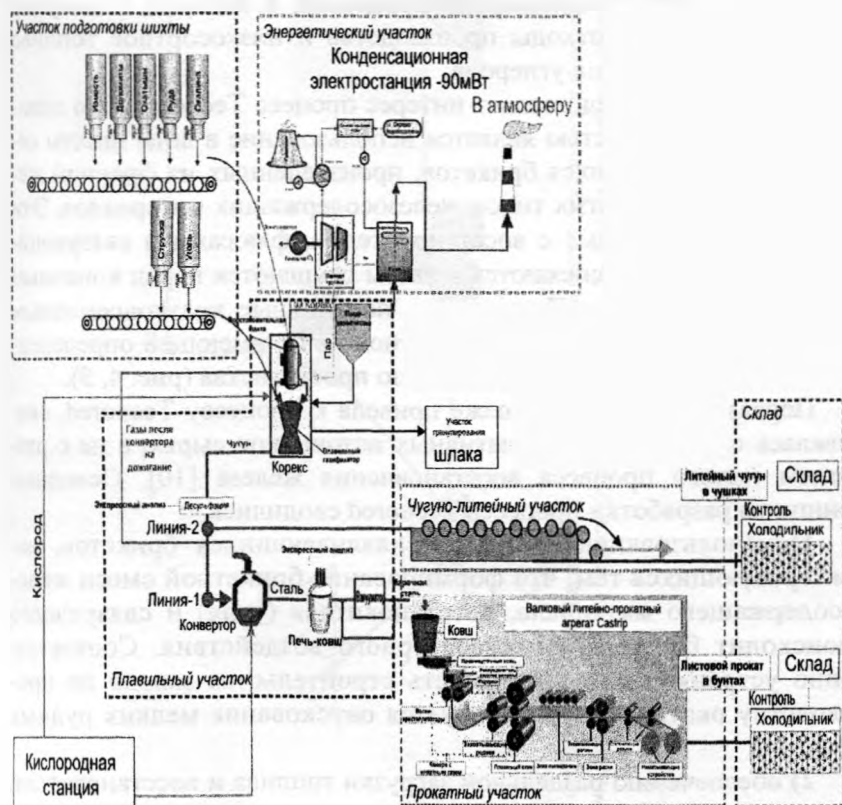


Рис. 3. Схема производства листового проката

ки стали, где осуществляется доводка по химическому составу путем добавки легирующих элементов, дегазация стали и уменьшение количества неметаллических включений. После внепечной обработки сталь направляется на литейно-прокатный агрегат Castrip, где формируется полосовой прокат.

Вместе с тем вопросы использования процесса Corex требуют дальнейшей проработки и сравнения с альтернативными вариантами в связи с тем, что в конкретном случае необходима закупка коксующихся углей, железорудных окатышей (или строительство мини-завода по их производству) и др. Кроме того, стоимость высококачественного железорудного сырья также растет и использование мелких фракций железной руды стимулировало разработку энергоэффективных производственных процессов, в которых к тому же могут применяться отходы производства и низкосортное топливо как основной источник углерода.

В этой связи представляет интерес процесс Tesnored. Его отличительной особенностью является использование в виде шихты самовосстанавливающихся брикетов, произведенных из фракций железной руды или других типов железосодержащих материалов. Эти материалы, смешанные с восстановителем, флюсами и связующими, брикетируются, спекаются и затем осушаются перед конечным применением в печи. После этого полученные кратковременным спеканием брикеты плавятся в шахтной печи, имеющей определенную дифференцированную геометрию пространства (рис. 4, 5).

Первая идея, которая позже привела к процессу Tesnored, связывалась с поиском альтернативных источников сырья, а не с развитием нового процесса восстановления железа [10]. Основные принципы разработки процесса Tesnored сводились к:

- 1) использованию самовосстанавливающихся брикетов, характеризующихся тем, что формирование брикетной смеси железосодержащего материала, восстановителя (угля) и связующего происходит без высокотемпературного воздействия. Соответственно устраняется необходимость строительства завода по производству окатышей и не требуется окускование мелких рудных фракций;

- 2) обеспечению раздельной загрузки топлива и восстановителя. Твердое топливо загружается непосредственно в горн специально разработанной печи, минуя прохождение шахты;

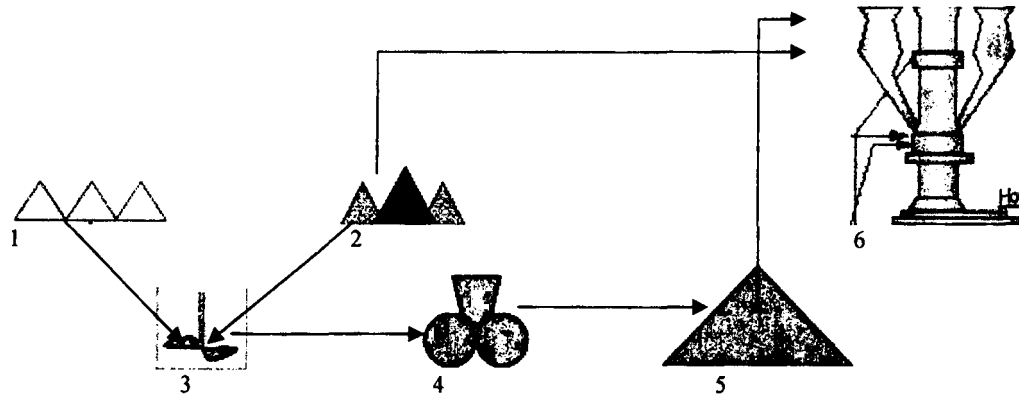


Рис. 4. Схема процесса Tesnored: 1 – площадка для хранения связующих и флюсов; 2 – площадка для хранения руды и топлива; 3 – смеситель; 4 – брикетирующее устройство; 5 – площадка для спекания и хранения брикетов; 6 – печь Tesnored

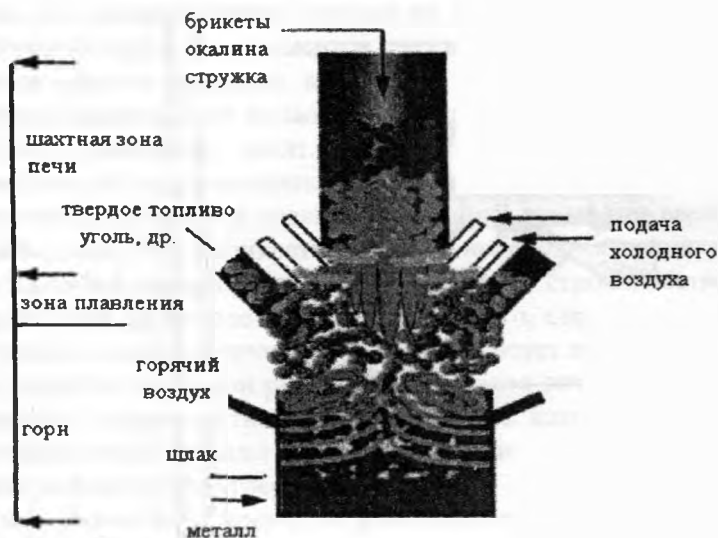


Рис. 5. Разрез печи Tesnored

3) использованию дутья горячего и холодного воздуха на двух разных уровнях печи. Дожигание газов обеспечивает необходимое количество теплоты для процесса восстановления в шахте.

Главная составляющая процесса — специально разработанная низкошахтная печь Tesnored со специфической геометрией и предназначенная для получения передельного чугуна в процессе жидкофазного прямого восстановления мелких фракций руды и угля. Она характеризуется боковой подачей твердого топлива и дожиганием монооксида углерода в верхней части шахты, приводящим к высвобождению энергии для предварительного разогрева и восстановления шихты. В этом варианте шихта, составленная из самовосстанавливающихся брикетов, загружается через центральную камеру и сразу же нагревается восходящими газами, движущимися в противоположном направлении, и восстанавливается за очень короткий промежуток времени в верхней части шахты (20–0 мин).

Процесс характеризуется высокой эффективностью, отсутствием использования чистого кислорода, кокса, окатышей. Типы применяемых углеродсодержащих материалов (табл. 1):

• в качестве восстановителя в брикетах – мелкие фракции некоксуемого угля (антрацит, полуантрацит и др.), древесного угля, углеродсодержащих остатков, нефтяного кокса и др.;

• в качестве топлива – низкопрочный полукокс, кусковой уголь, кусковой нефтяной кокс, брикеты угля, биомасса (дрова, стволы деревьев), куски автомобильных шин и пластмассовый скрап, которые могут использоваться либо самостоятельно, либо в смесях [10–13].

Таблица 1. Топливо для процесса Tesnored

Материал	Фракции твердого топлива
Некоксуемый уголь	Кусковой антрацит и полуантрацит, брикеты угля мелких фракций,
Побочные продукты нефтепереработки	Нефтяной кокс, битумные угли
Кокс низкой стоимости	Высокозольный полукокс, низкопрочный кокс
Биомасса	Древесный уголь, древесные отходы в количестве 20 % в смеси с углем, обугленные деревянные дрова-обрезки, брикеты из мелких фракций древесного угля
Отходы	Куски шин (до 20 % в смеси с углем), пластмассовый скрап (до 20 % в смеси с углем)

Для железосодержащего сырья применяются: мелкие фракции железной руды, шламы металлургических производств, окалина, низкосортные отходы металлообрабатывающих производств, др.

Технология Tesnored может функционировать в четырех версиях [11]:

а) Smelter™

Данная версия процесса сочетает восстановление и последующее плавление самовосстанавливаемых брикетов, образованных из руды мелких фракций, носителя углерода, флюсов и связующих, для производства жидкого металла. Одно из преимуществ – высокая скорость процесса, порядка 20–30 мин;

б) Finisher™

Эта версия предусматривает брикетирование губчатого железа с фракциями угля. Процесс способствует ошлаковыванию пустой породы и науглероживанию железа, создавая чистый металл, доступный для электросталеплавильного процесса, понижая расход энергии и значительно увеличивая производительность электродуговой печи;

в) Melter™

Цель данной разновидности – оптимизировать плавление разнообразной металлической шихты, включающей низкокачественный скрап и стружку из отходов металлообработки. Преимущества заключаются в более низкой стоимости плавления благодаря эффективности процесса и использования низкостоимостного восстановителя;

г) T-RIOS™

Данная версия сочетает восстановление и последующее плавление самовосстанавливающихся брикетов, состоящих из железо- и углеродсодержащих остатков, полученных после рудниковых и металлургических процессов. Вследствие высокой производственной гибкости в технике приготовления брикетов стальные отходы, обогащенные железом и углеродом, могут использоваться в виде шихты (сюда входят шламы металлургических производств, остатки коксовых заводов, окалина, пыль агломерационных заводов, остатки и пылеотложения после сталеплавильного процесса, т. д.).

Все версии процесса – эффективная альтернатива в производстве жидкого чугуна для сталелитейных заводов (интегрированных или мини-заводов) или для литейных цехов. Один и тот же реактор может быть использован для каждой из упомянутых операций в зависимости от типа шихты, доступной для загрузки. Вероятно, с учетом планируемого производства полосового проката в экономико-географических условиях, свойственных Беларуси, наибольший интерес представляют T-RIOS, MELTER, SMELTER.

The American Iron and Steel Institute's (AISI) совместно с Carnegie Mellon University in Pittsburgh, Pennsylvania выполнили исследования по использованию биомассы в процессе производства стали [14–15], в частности древесного угля как возобновляемого источника энергии. Отмечено, что при применении древесного угля эмиссия парниковых газов может быть понижена на 90 %. По оценкам

[15], для производства 1 млн т восстановленного чугуна необходимо использовать приблизительно 32 км² леса. Дополнительно можно использовать сопутствующие продукты от деревообработки и отходов целлюлозно-бумажной промышленности.

В виде дополнительного топливного ресурса следует также рассмотреть гидролизный лигнин как продукт отхода целлюлозно-бумажных комбинатов, который имеет меньшее содержание серы [2]. Применение при гидролизе лигнина соляной кислоты позволяет свести содержание серы до минимума.

Таким образом, гибкий, доступный и недорогой выбор топлива, более полноценное использование собственных сырьевых и топливных ресурсов и отходов производств (целлюлозно-бумажного, нефтеперерабатывающего) создают предпосылки для оценки применения процесса Tescnored в условиях Республики Беларусь, поскольку данная технология представляет собой альтернативный процесс с экономическими и экологическими преимуществами [11–13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский, В. И. Развитие металлургического комплекса на базе промышленного освоения железных руд (для использования в Республике Беларусь) / В. И. Тимошпольский // *Литье и металлургия*. – 2007. – № 2. – С. 6–17.
2. Ожогин, В. В. Использование нетрадиционных восстановителей в производстве металлизованных брикетов / В. В. Ожогин, А. П. Бочек // *Сталь*. – 2007. – № 1. – С. 96–99.
3. Blejde, W. Development of Low Carbon Thin Strip Production Capability at Project "M" / W. Blejde, R. Mahapatra, H. Fukase. // *Iron and Steelmaker*. – 2000. – V. 27 – No 4. – P. 29–33.
4. The CASTRIP Process – An Update on Process Development at Nucor Steel's First Commercial Strip Casting Facility / M. Schueren [et al.] // *AISTech 2007*. Indianapolis. – Indiana. USA. – 7–10 May. – 2007.
5. Evolution of Microstructures and Product Opportunities in Low Carbon Steel Strip Casting / K. Mukunthan [et al.] // *Brimacombe Symposium*. – Vancouver. British Columbia. Canada. – 1–4 October. – 2000.
6. Kastner, W. Next Generation Corex Technology / W. Kastner // *Metals&mining*. – 2007. – No 1. – P. 25.
7. Tara Goldsworthy, Carolyn McCarthy. HIs melt – Meeting the High Quality Metallics Challenge // *SEAISI 2001 – «Challenges for the Asian Steel Industry in the New Era»* (14 – 16 May 2001).
8. Pablo, E. Duarte. HYL Direct Reduction Technology: Adaptations for the Indian Market / E. Pablo // *Tenova Steelmaking using HYL DRI* // HYL, Hylsa Technology Division. – Mexico, 2006.

9. *James, M. McClelland. Proven FASTMET Process: Right For India / M. James // Midrex Technologies Incorporated. Originally presented at the Conference on Direct Reduction and Smelting on October 5-th&6-th in Jamshedpur, India.*

10. *Recycling Of CST By-Products By Tecnoled Ironmaking / José Henrique Noldin [et al.] // Technical contribution to the 2nd International Meeting on Ironmaking, Theme «Environment / wastes recycling», September 12 to 15, 2004 – Vitória - ES – Brazil.*

11. *José Henrique Noldin. Tecnoled Process - High Potential in Using Different Kinds of Solid Fuels / José Henrique Noldin [et al.] // Received: July 19, 2004; Revised: April 25, 2005.*

12. *Marcheze, E. S. A biomassa no processo tecnored / E. S. Marcheze [et al.] // In International Congress on Biomass for Metal Production & Electricity. 1st, ISS Brazilian section. Belo Horizonte. – Brazil, 2001.*

13. *José Henrique Noldin. Tecnoled Process Low Cost Pig Iron Production / José Henrique Noldin, Marcos de Albuquerque Contrucci, Lose Carlos D'Abreu // Scrap Substitutes And Alternative Ironmaking IV // 2004, 11, Baltimore.*

14. *Fruehan, R. J. Sustainable Steelmaking Using Biomass And Waste Oxides / R. J. Fruehan // Final Report. Carnegie Mellon University Pittsburgh PA September 30, 2004. Work performed under Cooperative Agreement No. DE-FC36-97ID13554. Prepared for U.S. Department of Energy.*

15. *Gobind Jagtiani. Evaluation of Sustainable Steelmaking Using Biomass and Waste Oxides / Gobind Jagtiani // Center for Ironmaking & Steelmaking Research, Pittsburgh, PA.*

УДК 669.187

**В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
А. В. ВЕДЕНЕЕВ (РУП «БМЗ»)**

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОЛОК В СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛОКОРДА

Производство металлокорда является промежуточным звеном в изготовлении резинотехнических изделий, в частности автомобильных шин. Основными критериями оценки качества изготавливаемого металлокорда являются его физико-механические характеристики, которые в полной мере должны обеспечивать требуемую ходимость шин при эксплуатации и снижение расходов в процессе изготовления шин, что в свою очередь предъявляет высокие требования